# Über elektromagnetische Tragkraft.

Von Prof. Dr. A. v. Waltenhofen in Prag.

(Mit 2 Tafeln.)

Die bisherigen Untersuchungen über die Tragkraft von hufeisenförmigen Elektromagneten haben zu ganz widersprechenden Resultaten geführt. Man fand die Tragkräfte bald in demselben Verhältnisse wie die Stromstärken, bald in einem kleineren, bald wieder in einem größeren Verhältnisse wachsen.

Eine proportionale Zunahme ergibt sich z. B., wie Jacobi gezeigt hat, aus den Versuchen von Dal Negro und auch aus einigen Versuchen von Jacobi selbst. Ähnliches fand Fechner. Dagegen fanden Lenz und Jacobi bei Anwendung von abgerundeten Ankern eine etwas raschere Zunahme der Tragkraft, womit auch Dub's Beobachtungen übereinstimmen, — bei anderen Versuchen mit ebenen Ankern jedoch ein Zurückbleiben der Tragkraft hinter der Stromstärke. Dieses letztere Verhalten beobachteten auch Müller und Poggendorff und zwar in sehr hohem Grade. — Dub, welcher ein solches Zurückbleiben der Tragkräfte bei seinen Versuchen nur an einem dünnen Hufeisen beobachtete, behauptet: daß die Tragkraft in einem Verhältnisse wachse, welches zwischen dem einfachen und quadratischen liegt, jedoch näher dem letzteren [1]).

Die widersprechenden Resultate anderer Experimentatoren, welche eine geringere Zunahme der Tragkraft fanden, namentlich die von Dal Negro, Fechner, Müller und Poggendorff beobachteten Verhältnisse, glaubt Dub durch die Annahme erklären zu können: die bei diesen Versuchen benutzten Magnete seien gegenüber den in Anwendung gebrachten Stromstärken von so kleinen

[1]) Eine Übersicht der bisherigen Untersuchungen über die Tragkraft von hufeisenförmigen Elektromagneten findet man in Dub, „Elektromagnetismus" Seite 137 bis 143 und in Wiedemann, „Galvanismus und Elektromagnetismus" 2. Band. Seite 402—416.

Dimensionen gewesen, daß „Sättigung eingetreten ist," — eine Annahme, die wohl dahin gestellt bleiben muß, da nirgends die Daten angegeben sind, aus welchen sich ermitteln ließe, welche Sättigungsgrade die besagten Magnete bei jenen Versuchen thatsächlich erreicht haben.

Unter dem „Eintreten der Sättigung", wenn dies nicht eine ganz vage Bezeichnung sein soll, kann hier wohl nichts anderes verstanden werden als eine Magnetisirung, welche im Vergleiche mit der erzeugenden Stromstärke bereits hinter der dem Lenz-Jacobischen Gesetze entsprechenden Proportionalität zurückgeblieben ist. In der That gebraucht Dub obigen Ausdruck stets in diesem Sinne.

Dies vorausgesetzt kann die obige von Dub aufgestellte und meines Wissens ziemlich allgemein angenommene Behauptung über das Wachsen der Tragkraft keinen anderen Sinn haben als:

„So lange Ströme angewendet werden, mit welchen die im nicht verankerten Hufeisen erzeugten Magnetismen proportional bleiben, wachsen die Tragkräfte rascher als jene Ströme".

Denn, wollte man den Zustand vor eintretender Sättigung in dem bisher nirgends angewendeten Sinne auffassen, daß die im verankerten Hufeisen erregten Magnetismen den angewendeten Stromstärken proportional wären, so würde einerseits der Satz: daß in diesem Falle die Tragkraft rascher als die Stromstärke wächst, eine ganz selbstverständliche nothwendige Folgerung sein, die gar keines Beweises mehr bedürfte, — anderseits aber auch gar keinen Werth haben, weil man eben nicht weiß, ob überhaupt jemals innerhalb meßbarer Grenzen eine solche Proportionalität stattfindet, vielmehr Poggendorff's Versuche[1]) über das totale Moment eines verankerten Magneten nur ein Zurückbleiben desselben hinter den Stromstärken constatirt und somit den fraglichen Zustand vor eintretender Sättigung in diesem Sinne als nicht existirend herausgestellt haben.

Nimmt man aber das oben erwähnte Gesetz der Tragkraft in dem angegebenen einzig zulässigen Sinne, so steht es mit sorgfältigen und zahlreichen Versuchen, welche ich darüber angestellt habe, im entschiedensten Widerspruche.

---

[1]) Pogg. Ann. Bd. 85 (Siehe Wiedemann, II, 401).

Diese Versuche, welche Gegenstand der vorliegenden Abhandlung sind, dürften insofern großes Gewicht haben, weil bei jedem derselben der durch den magnetisirenden Strom hervorgebrachte Sättigungsgrad im nicht verankerten Magnet direct und genau gemessen worden ist, so daß darüber gar kein Zweifel obwalten kann, während die bisherigen Versuche über die dabei angewendeten Sättigungsgrade gar keinen Aufschluß geben, weßhalb denn auch alle unter diesbezüglichen Voraussetzungen daraus abgeleiteten Schlußfolgerungen — da diese Voraussetzungen eben nicht constatirt werden können — als auf unbewiesenen Annahmen beruhend, ganz unzuverlässig sind.

Der Apparat, dessen ich mich bei meinen Versuchen bediente, bestand aus folgenden Theilen:

1. Die Vorrichtung zur Messung der Tragkräfte. Dieselbe ist Fig. 1 abgebildet. Im unteren Theile eines rahmenförmigen hölzernen Gestelles ist der untersuchte Elektromagnet mit aufwärts gekehrten Schenkeln befestigt. Sein Eisenkern ist ein, soweit die Magnetisirungsspirale reicht, fast halbkreisförmig zusammengebogener runder Stab von 181 Millim. Länge und 10 Millim. Durchmesser und wiegt 116·39 Grammen. Diesen Eisenkern umgibt eine dicht anliegende Spirale von 52 Windungen eines 2 Millim. dicken gut übersponnenen Kupferdrahtes. Ein zweiter genau eben solcher Elektromagnet diente als Anker und zwar entweder:

*A.* im nicht magnetisirten Zustande, das heißt in der Weise, daß seine Spirale unbenutzt blieb, oder

*B.* in der Art, daß derselbe Strom sowohl durch die Windungen des fixen Elektromagneten als auch durch jene des eben besagten Ankers geleitet wurde und somit beide genau gleich magnetisirte, wobei die Drahtverbindung selbstverständlich so angeordnet war, daß die ungleichnamigen Pole übereinander kamen.

*C.* Außerdem war beim Apparate noch ein dritter Anker, bestehend aus einem Stücke weichen Eisens von beiläufig 133 Millim. Länge, 44 Millim. Breite, 10 Millim. Dicke und 500·4 Grammen Gewicht. Die für die ebenen Polflächen des Elektromagneten bestimmte Seite dieses Ankers ist halbcylindrisch abgerundet, während der andere Anker, so wie der fixe Elektromagnet, ebene Berührungsflächen hat.

Der bei den betreffenden Versuchen benutzte Anker wurde, wie aus der Abbildung ersichtlich, an eine Federwage gehängt, die selbst wieder an einer einfachen Aufzugsvorrichtung hängt. Eine starke Saite nämlich, an deren einem Ende die Federwage befestigt ist, läuft zunächst über eine fixe Rolle am oberen Querbalken des Gestelles und ist mit ihrem anderen Ende an der Peripherie einer an demselben Querbalken befindlichen zweiten Rolle festgemacht, die mittelst einer in der Richtung eines Radius angebrachten Handhabe gedreht werden kann. Diese zweite Rolle ist übrigens, wie die Abbildung zeigt, auch noch mit einer Verzahnung versehen, welche ihre Arretirung mittelst eines Sperrhakens gestattet, wovon übrigens in den meisten Fällen kein Gebrauch gemacht wurde, indem dieser Sperrhaken in der Regel ausgerückt blieb.

Bei diesem Apparate konnte man nun, sobald der Anker angezogen war, mit einer bequem und sicher auszuführenden Handbewegung an der Kurbel, die Federwage beliebig langsam spannen und den Gang des Zeigers dabei verfolgend die Spannung ablesen, bei welcher das Abreißen des Ankers erfolgte.

2. Der Apparat zur Bestimmung des Sättigungsgrades des Elektromagneten. Zu diesem Zwecke benutzte ich meinen in der Abhandlung „Über das elektromagnetische Verhalten des Stahles" (Sitzungsber. Bd. 48) beschriebenen und seither auch bei anderen Untersuchungen vielfach verwendeten magnetischen Meßapparat in der Fig. 2 dargestellten Anordnung. — In einem der beiden Schlitten — westlich von der Bussole — befand sich in senkrechter Lage zum magnetischen Meridian ein gerader Elektromagnet, der, sowohl was den Eisenkern als auch was die Spirale betrifft, auf das Genaueste mit dem oben beschriebenen Elektromagnet übereinstimmt, mit dem einzigen Unterschiede, daß eben der eine gebogen, der andere aber gerade ist. — Östlich von der Bussole befand sich eine gleiche Spirale wie bei dem soeben beschriebenen geraden Elektromagnet, aber ohne Eisenkern, zur Vermeidung von Biegungen jedoch mit einem eingeschobenen Holzstäbchen von gleicher Größe versehen, welches in der Zeichnung weggelassen ist. Beide Spiralen waren so eingestellt und verbunden, daß sich ihre Wirkungen auf die Nadel vollkommen aufhoben, was vor jeder Versuchsreihe, nach vorläufiger Entfernung des Eisenstabes, mit den größten verfügbaren Stromstärken sorgfältig geprüft wurde.

Hatte man sodann den Eisenstab wieder eingeschoben, so zeigte die Bussole lediglich die vom Stabe bewirkten Ablenkungen an, aus welchen sofort auch die den angewendeten Stromstärken entsprechenden Sättigungsgrade des geraden und des gleichzeitig in dieselbe Stromleitung eingeschalteten hufeisenförmigen Elektromagneten (diesen letzteren als nicht verankert angenommen) berechnet werden konnten[1]).

Zum Behufe dieser Rechnungen war die Horizontalintensität des Erdmagnetismus am Aufstellungsorte dieses Apparates zuvor mit einem Lamont'schen Theodolith wiederholt gemessen und (in dem nicht eisenfreien Locale) = 1·725 gefunden worden. Der Abstand der Mitte des Stabes von der Axe der Bussole betrug 593·5 Millim.

Die mehrfach erwähnte Bussole ist eine besonders sorgfältig gearbeitete mit einer Balkennadel mit Achathütchen versehene Meßtischbussole.

3. Die zur Erzeugung, Messung, Regulirung und Umkehrung des Stromes dienenden Instrumente und Geräthschaften.

Als Stromquelle diente eine Kohlenbatterie, welche bei den zulässigen Widerstandsänderungen eine Steigerung der Stromstärke bis zu circa 250 chemischen Einheiten gestattete, welche Stromstärke eben erforderlich war, um den Eisenkern bis zu 50 $^0/_0$ der absoluten Sättigung zu bringen.

Zum Messen der Stromstärke dienten abwechselnd zwei Gaugain'sche Tangentenbussolen, bei welchen sich für die Reductionscoëfficienten der Ablenkungstangenten auf chemisches Maß beziehungsweise die Zahlen 4·43 und 40·81 ergeben hatten.

Zur Regulirung des Stromes waren eine Siemens'sche Widerstandsscala und ein Schrauben-Rheostat nach Poggendorff (mit Serpentinwalze) in Verwendung.

Zur Umkehrung und Unterbrechung des Stromes diente ein Pohl'sches Gyrotrop, aus Quecksilbernäpfen und dicken Drahtbügeln gebildet.

---

1) Gleichwohl wird im Allgemeinen, wenn man sich einen geraden Elektromagnet zu einem Hufeisen zusammengebogen denkt, diese Formänderung in Folge der Wechselwirkung beider Schenkel eine etwas veränderte magnetische Erregung bedingen doch kann dieselbe im vorliegenden Falle bei der verhältnißmäßig großen Entfernung beider Schenkel keinen irgend erheblichen Einfluß auf den hier in Rede stehenden Sättigungsgrad haben.

Die einzelnen Theile des beschriebenen Apparates waren so aufgestellt und verbunden, daß weder der Hufeisenmagnet noch die Leitungsdrähte eine störende Wirkung auf die beiden Bussolen üben konnten und daß die Bussole des magnetischen Meßapparates auch keine Störung von Seite der Tangentenbussole erfuhr. Doch wäre die Entfernung dieser beiden Instrumente zu gering gewesen, um auch eine störende Wirkung des geraden Elektromagneten auf die Tangentenbussole zu verhindern, weßhalb der Eisenkern vor jeder Ablesung an der Tangentenbussole aus seiner Spirale (welche für sich allein nicht mehr auf die Tangentenbussole wirkte) entfernt werden mußte, nachdem zuvor seine Wirkung auf die Meßtischbussole an dieser abgelesen worden war. Dies geschah für jede Stromstärke zweimal, nämlich bei gewechselter Stromrichtung, und sind daher die nachstehend angeführten Ablenkungswinkel an beiden Bussolen immer die Mittel aus je zwei bei entgegengesetzter Stromrichtung gemachten Ablesungen. Bei jeder Stromrichtung wurden mindestens zwei Tragkraftsbestimmungen gemacht, also mindestens vier bei jeder Stromstärke, deren Mittel die nachstehend angegebenen Tragkräfte sind.

In solcher Weise wurden mehrere Versuchsreihen ausgeführt, so daß endlich fast für jede einzelne oder doch nicht viel verschiedene Stromstärken mehrere Tragkraftsbestimmungen vorlagen, von welchen jedoch immer diejenige, welche den größten Werth ergab, als die richtigste angesehen und bei der graphischen Darstellung (Fig 3.) der Versuchsresultate zu Grunde gelegt wurde. Es ist nämlich bei magnetischen Tragkraftsbestimmungen allgemein üblich und auch ganz gerechtfertigt nach diesem Grundsatze vorzugehen, indem man wohl annehmen muß, daß dort, wo bei Anwendnng gleicher Stromstärken verschiedene Tragkräfte sich ergaben, die kleineren durch ungünstige Stellungen des Ankers beim Abreissen herbeigeführt worden sind.

Die in der Rubrik $\alpha$ stehenden Zahlen sind die Ablenkungen an der Tangentenbussole und es bedeutet die beigefügte römische Zahl das bei dem betreffenden Versuche benutzte Instrument, nämlich I jenes mit dem größeren, II jenes mit dem kleineren Reductionsfactor.

Unter $s$ sind die Stromstärken nach chemischen Maße angeführt.

Unter $\beta$ kommen die vom geraden Elektromagneten bewirkten Ablenkungen an der Meßtischbussole vor und unter $p$ die entsprechenden Sättigungsgrade in Procenten, wobei ein Moment von 2100

absoluten Einheiten per Milligramm als Grenze der Magnetisirbarkeit angenommen war[1]). Die mit *V* überschriebenen Zahlen sind die Verhältnißzahlen dieser Sättigungsgrade unter sich, wobei die kleinste bei meinen Versuchen vorgekommene Sättigung von 3·01 % als Einheit zu Grunde liegt. — Die Quotienten $\frac{p}{s}$ lassen die Proportionalität zwischen Magnetismus und Stromstärke erkennen.

Unter *T* endlich sind die Tragkräfte in Kilogrammen verzeichnet. Sie sind an der von 2 bis 20 Kilogramm hergestellten und von Zeit zu Zeit revidirten empirischen Scala der Federwage abgelesen, oder vielmehr die oben näher bezeichneten Mittelwerthe dieser Ablesungen.

Mit jedem der drei Anker *A*, *B* und *C* wurden Versuche gemacht und ich lasse die Ergebnisse derselben nun der Reihe nach folgen[2]).

### Anker A.

| Nr. | | | | β | p | T | $\frac{p}{s}$ | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | II | 74°48' | 16·29 | 2°22' | 3·01 | 1·97 | 0·194 | 1·00 |
| 2 | II | 81 3 | 28·11 | 4 22 | 5·57 | 4·17 | 0·198 | 1·85 |
| 3 | II | 82 51 | 35·29 | 5 19 | 6·79 | 4·92 | 0·192 | 2·25 |
| 4 | II | 84 27 | 45·55 | 6 58 | 8·91 | 6·27 | 0·196 | 2·96 |
| | I | 65 27 | 89·35 | 13 42 | 17·78 | 10·27 | 0·199 | 5·90 |
| 6 | II | 87 23 | 96·86 | 14 35 | 18·98 | 10·27 | 0·196 | 6·30 |
| 7 | II | 88 3 | 130·01 | 18 49 | 24·85 | 11·37 | 0·191 | 8·24 |
| 8 | I | 77 48 | 188·77 | 27 42 | 38·29 | 14·02 | 0.203 | 12·70 |
| 9 | I | 80 36 | 246·53 | 35 10 | 51·39 | 14·42 | 0·208 | 17·05 |
| 10 | I | 80 42 | 249·23 | 35 33 | 52·12 | 14·42 | 0·209 | 17·29 |

[1]) Siehe meine hierauf bezügliche Abhandlung. Sitzungsberichte Bd. 59.

[2]) Selbstverständlich wurde von der an der Federwage abgelesenen Tragkraft überall das Gewicht des betreffenden Ankers, nämlich 0·2313 Kilogr. für *A* oder *B* und 0·5004 Kilogr. für *C* in Abzug gebracht.

### Anker B.

| Nr. | | | | $\beta$ | $p$ | $T$ | $\frac{p}{s}$ | $V$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | II | 74°34' | 16·03 | 2°26' | 3·10 | 5·37 | 0·193 | 1·02 |
| 2 | II | 83 15 | 37·40 | 5 36 | 7·15 | 8·97 | 0·191 | 2·37 |
| 3 | II | 84 27 | 45·55 | 6 50 | 8·74 | 10·27 | 0·192 | 2·90 |
| 4 | II | 87 13 | 91·05 | 13 34 | 17·60 | 13·87 | 0·193 | 5·84 |
| 5 | I | 80 12 | 236·28 | 34 18 | 49·75 | 16·24 | 0·211 | 16·51 |

### Anker C.

| Nr. | | | | $\beta$ | $p$ | $T$ | $\frac{p}{s}$ | $V$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | I | 21°15' | 15·87 | 2°36' | 3·31 | 3·75 | 0·209 | 1·10 |
| 2 | I | 33 49 | 27·34 | 4 22 | 5·57 | 6·15 | 0·204 | 1·85 |
| 3 | I | 42 27 | 37·33 | 6 21 | 8·12 | 7·35 | 0·217 | 2·69 |
| 4 | I | 55 45 | 59·95 | 10 0 | 12·86 | 9·90 | 0·215 | 4·27 |
| 5 | I | 57 0 | 62·85 | 10 30 | 13·52 | 10·90 | 0·215 | 4·48 |
| 6 | I | 68 0 | 101·02 | 16 45 | 21·95 | 12·82 | 0·217 | 7·28 |
| 7 | I | 75 57 | 163·09 | 25 55 | 35·44 | 14·50 | 0·217 | 11·76 |
| 8 | I | 79 12 | 213·95 | 32 21 | 46·20 | 15·50 | 0·216 | 15·33 |

Mit dem Anker *A* war eine größere Anzahl von Versuchen gemacht worden, von welchen in obiger Tabelle diejenigen zusammengestellt sind, welche die relativ größten Tragkräfte ergaben. Die übrigen, welche übrigens unten sich ebenfalls einen ziemlich regelmäßigen Verlauf zeigen, enthält die nachstehende Tabelle.

### Anker A.

| Nr. | $\alpha$ | | $s$ | $\beta$ | $p$ | $T$ | $\frac{p}{s}$ | $V$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 | I | 30°39' | 24·18 | 4°16' | 5·44 | 3·27 | 0·225 | 1·80 |
| 12 | I | 45 27 | 41·46 | 6 45 | 8·63 | 5·27 | 0·208 | 2·86 |
| 13 | I | 52 6 | 52·43 | 7 45 | 9·93 | 6·07 | 0·189 | 3·29 |
| 14 | I | 55 0 | 58·29 | 9 45 | 12·53 | 6·72 | 0·215 | 4·16 |
| 15 | I | 61 21 | 74·70 | 12 24 | 16·04 | 7·57 | 0·215 | 5·32 |
| 16 | I | 68 6 | 101·53 | 16 42 | 21·88 | 9·02 | 0·216 | 7·26 |
| 17 | I | 72 0 | 125·61 | 20 30 | 27·27 | 10·52 | 0·217 | 9·05 |
| 18 | I | 78 57 | 208·99 | 30 30 | 42·96 | 12·67 | 0·206 | 14·25 |
| 19 | I | 80 36 | 246·53 | 35 12 | 51·45 | 13·22 | 0·209 | 17·07 |

Einen besseren Überblick der Resultate gewährt die Fig. 3 beigefügte graphische Darstellung der in den drei ersten Tabellen angeführten Tragkraftsbestimmungen, wobei die Sättigungsprocente als Abscissen und die Tragkräfte in Kilogrammen als Ordinaten aufgetragen sind.

Die Curve für den Anker *C* verläuft zwischen jenen für den nicht magnetisirten und für den magnetisirten Hufeisenanker. Alle drei Curven zeigen eine ziemlich rasche Convergenz gegen eine zur Abscissenaxe parallele Asymptote, welche einem Tragkraftsmaximum von 18 Kilogrammen entsprechen dürfte.

Man sieht, daß die beobachteten Tragkräfte diesem Maximum schon bei einer Stromstärke ziemlich nahekommen, welche im nicht verankerten Magnet erst ungefähr die halbe Sättigung erzeugt. Ein rascheres Anwachsen der Tragkraft im Vergleiche mit der Stromstärke ist nur bei viel kleineren Sättigungsgraden beobachtet worden, nämlich beim Anker *A* bei Tragkräften zwischen 2 und 4 Kilogrammen, welche Sättigungsgraden von etwa 3 bis 5 $^0/_0$ im nicht verankerten Magnet entsprechen und etwa dem 26fachen Gewichte des Magneten gleich-

kommen. Es ist daher sehr erklärlich wenn Dub[1]) z. B. bei seinen Versuchen mit einem Hufeisenmagnet von 1 Zoll Schenkeldurchmesser und 6 Zoll Schenkellänge bis zur Tragkraft von 68 Pfunden eine raschere Zunahme der Tragkräfte im Vergleiche mit den Stromstärken erhalten hat. Diese Tragkraft von 68 Pf. beträgt nämlich (wenn die ganze Länge des ausgestreckten Hufeisens zu etwa 18 Zollen gerechnet wird) beiläufig nur das 17fache vom Gewichte des Magneten und läßt daher mit großer Wahrscheinlichkeit einen noch viel geringeren Sättigungsgrad voraussezten als im so eben besprochenen Falle, nämlich von ungefähr 4% im nicht verankerten Hufeisen. Im Bereiche so geringer Sättigungsgrade wächst aber auch der freie Magnetismus eines Eisenstabes noch in einem rascheren Verhältnisse als die Stromstärken[2]). Damit soll übrigens nicht gesagt sein, daß hierin die einzige Ursache für die innerhalb gewisser Grenzen beobachtete raschere Zunahme der Tragkräfte liege, denn offenbar kommt hier auch noch die Rückwirkung des Ankers in Betracht, deren Antheil an der magnetischen Erregung des geschlossenen Hufeisens jedoch mit zunehmender Sättigung sehr rasch abnehmen muß.

In der That ist eine raschere Zunahme der Tragkraft im Vergleiche mit der Stromstärke durch die Versuche von Dub und von mir nur für sehr gering Magnetisirungen constatirt und in dieser,

---

[1]) „Elektromagnetismus" Seite 141.

[2]) Ich will hier beispielsweise einen Versuch dieser Art anführen mit einem Eisenstabe, an welchem ich diese Anomalie in einem ungewöhnlich hohen Grade beobachtet habe. Ein 103 Millimeter langer und 20 Millimeter dicker Cylinder wurde magnetisirt in einer eng anschließenden 91 Millimeter langen Spirale mit 4 Lagen von je 24 Windungen eines 3 Millimeter dicken Kupferdrahtes. Derselbe zeigte bei den in der Rubrik $x$ angeführten Stromstärken (deren Einheit ungefähr 9 chemische Stromeinheiten betrug) die in der Rubrik $y$ beigefügten Magnetismen (in Millionen von abosluten Einheiten ausgedrückt).

| $x$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y$ | 6·02 | 12·97 | 21·67 | 31·77 | 42·32 | 52·99 | 64·82 |

Man sieht hieraus, daß der erregte Magnetismus beinahe im Verhältnisse 1 zu 11 wuchs, während die Stromstärke auf das 7fache gesteigert wurde. Es mag hierbei noch bemerkt werden, daß dieser Stab, welchem vermöge seines Gewichtes ein magnetisches Maximum $=519$ entspricht, bei der Stromstärke $x = 3$ eine Sättigung von ungefähr 4% hatte.

aber auch nur in dieser Einschränkung findet sie auch in dem oben Gesagten ihre ganz befriedigende Erklärung.

Eine Tragkraftszunahme aber im quadratischen Verhältnisse der Stromstärke, zu deren Voraussetzung ein nicht ganz richtiges Raisonnement bisweilen geführt hat, ist meines Wissens niemals beobachtet worden und wäre auch nur innerhalb sehr enger Grenzen möglich.

Dazu würde nämlich erforderlich sein, daß auch der im geschlossenen Hufeisen und Anker erregte Magnetismus proportional den succesive angewendeten Stromstärken anwachse, was aber nur bei so äußerst geringen Magnetisirungen denkbar ist, bei welchen sichere Tragkraftsbestimmungen kaum ausführbar sein dürften.

Aber nicht nur bei der Berührung zwischen Magnet und Anker, wie sie bei Tragkraftsbestimmungen stattfindet, sondern auch bei der „Anziehung“ durch ein dünnes Diaphragma kann jene Proportionalität der in Wechselwirkung stehenden Magnetismen des Hufeisens und Ankers mit der Stromstärke und somit auch die dadurch bedingte Proportionalität der Anziehung mit dem Quadrate der Stromstärke nur eine sehr beschränkte sein. — In der That hat Dub bei einem Hufeisen von 6 Zoll Schenkellänge und $1/2$ Zoll Schenkeldurchmesser schon bei nicht sehr starken Strömen Abweichungen von diesem Gesetze erreicht [1]).

Wie rasch die magnetische Sättigung durch die Rückwirkung des Ankers (bei der unmittelbaren Berührung) gesteigert wird, läßt sich an einem speciellen Falle, den meine Versuche darbieten, nachweisen.

Einem Häcker'schen Stahlmagnet vom Gewichte (116 Gr.) meines Elektromagneten entspricht nach der (für Grammen umgerechneten) Häcker'schen Formel

$$T = 103 \cdot 33\, P^{\frac{2}{3}}$$

eine Tragkraft von 2·46 Kilogrammen, während seine Sättigung bei vorgelegtem Anker mit 400 absoluten Einheiten per Milligramm (d. i. etwa 20 %) gewiß nicht zu hoch angenommen ist, wenn man erwägt, daß ungefähr dieser Sättigungsgrad bei kleinen Stahlmagneten

---

1) „Elektromagnetismus“ Seite 132.

schon im nicht verankerten Zustande erreichbar ist[1]). Ungefähr dieselbe Sättigung wird also auch ein Elektromagnet haben müssen, um eine gleiche Tragkraft von 2·46 Kilogrammen zu äußern. Erwägt man nun, daß mein Elektromagnet die Tragkräfte 1·97 und 4·17 bei Stromstärken hatte, welche im nicht verankerten Magnet beziehungsweise die Sättigungsgrade von 3·01 und 5·57 % erzeugten, daß er also — wie man durch Interpolation findet — jene Tragkraft 2·46 bei einer Stromstärke haben würde, welche im nicht verankerten Magnet eine Sättigung von 3·5 % hervorbringt, so folgt hieraus, daß dieser Sättigungsgrad durch das Vorlegen des Ankers auf den nahezu 6fachen Betrag (von 20 %) gesteigert werden muß.

Demnach erscheint auch das Ergebniß meiner Versuche ganz erklärbar, daß nämlich die Tragkräfte nur bei sehr geringen Magnetisirungen rascher wachsen als die Stromstärken und sehr bald hinter der innerhalb enger Grenzen stattfindenden Proportionalität zurückbleiben, und zwar in der Art, daß Tragkräfte, welche dem Maximum schon ziemlich nahe kommen, schon bei Stromstärken erreicht werden, für welche das Lenz-Jacobi'sche Gesetz für den nicht verankerten Magnet noch in voller Geltung ist. — In der That zeigen meine Versuche mit dem Anker *C* eine Tragkraft (15·5) von 86% des Maximums (18) schon bei einer Stromstärke, welche im nicht verankerten Magnet nur eine Sättigung von 46% hervorzubringen vermag und für welche das Lenz-Jacobi'sche Gesetz noch vollkommen zutrifft.

Die widersprechenden Resultate verschiedener Beobachter, welche für die Tragkräfte bald ein mit den Stromstärken proportionales, bald ein rascheres und bald wieder ein langsameres Wachsen herausgestellt haben, erklären sich also einfach in der Weise, daß jedes dieser drei Gesetze innerhalb gewisser Grenzen

---

[1]) Nach W. Weber kann man bei einem sehr starken Stahlmagnet 400 absolute Einheiten auf 1 Milligramm Stahl rechnen. Doch scheint der erreichbare permanente Sättigungsgrad nach meinen Erfahrungen in hohem Grade von der Größe und Form des Querschnittes abhängig zu sein; denn, während es mir z. B. gelungen ist ein cylindrisches Stäbchen aus glashartem Wolframstahl von 6 Millim. Durchmesser bis auf nahe 470 Einheiten per Milligramm bleibend zu magnetisiren, fand ich bei zwei Haarlemer Magnetstäben vom Querschnitte $(17)^2$ Quadratmillimeter (bei etwa 100 Millimeter Länge) Momente von nur 40 bis 50 Einheiten per Milligramm.

Geltung hat, nach Maßgabe des bereits erreichten Sättigungsgrades.

In dem Berichte über die neuesten Fortschritte der Physik (Seite 531) versucht Müller die Ergebnisse seiner eigenen Untersuchungen über magnetische Tragkraft, welche ebenfalls eine rasche Annäherung an ein Maximum herausgestellt haben, mit seiner Formel für den Zusammenhang zwischen Magnetismus und Stromstärke in Einklang zu bringen, indem er dabei von dem Grundsatze ausgeht, daß die Tragkraft jedenfalls dem Quadrate des erregten Magnetismus proportional sein müsse.

Wenn Müller in Folge dessen sofort in der Formel

$$s = ad^{\frac{3}{2}} \operatorname{tg} \frac{m}{bd^2}$$ [1]

statt $m$ die Quadratwurzel der Tragkraft $\sqrt{t}$ substituirt, so ist dagegen zunächst einzuwenden, daß dieser Vorgang nur dann zulässig ist, wenn man $m$ nicht mehr die ursprüngliche Bedeutung des in einem nicht verankerten Magnet erzeugten freien Magnetismus, für welchen einzig und allein die Müller'sche Formel nachgewiesen worden ist, beilegt, sondern von der ganz willkürlichen Annahme ausgeht, daß diese Formel auch für den im geschlossenen Hufeisen erregten Magnetismus, der eben bei der Tragkraft in Rechnung kommt, Geltung habe. Natürlich hat dann auch $a$ einen anderen Werth, als wenn die Formel ihre gewöhnliche Bedeutung beibehalten soll, während $b$ durch die Einführung von $\sqrt{t}$ sofort auch von der Gestalt des Magneten und seines Ankers abhängig wird.

Dies vorausgesetzt kommt die weitere Frage in Betracht, ob die so transformirte Formel eine befriedigende Übereinstimmung mit den Beobachtungen zeigt.

Da die Seite 532 und 533 des citirten Berichtes enthaltene Zusammenstellung beobachteter und berechneter Werthe nicht vollständig ist, so habe ich die Rechnung beispielsweise für alle Seite

[1] Wobei s die Stromstärke, $m$ den erzeugten Magnetismus, $d$ den Stabdurchmesser und $a$ und $b$ Constante bedeuten.

528 verzeichneten mit dem Magnet Nr. I bei Anwendung der Spiralen II, III und IV angestellten Versuche ausgeführt mit Beibehaltung der von Müller selbst bestimmten Constanten. Dabei hat sich herausgestellt, daß die meisten Werthe allerdings gut stimmen, mitunter aber auch bedeutende Abweichungen hervortreten, wie z. B. die bei den Stromstärken 5, 10, 16 und 24 beobachteten Tragkräfte 1900, 7900, 6500 und 7500 im Vergleiche mit den berechneten 2573, 9049, 7263 und 8169 zeigen.

Bemenkenswerth ist auch das auffallend geringe Tragkraftsmaximum von nicht ganz 12 Kilogrammen, welches Müller aus seinen Versuchen mit dem vermöge der angegebenen Dimensionen mindestens 300 Grammen schweren Magnet Nr. I gefolgert hat, im Vergleiche mit der bei meinem nur 116 Grammen schwereren Magnet thatsächlich erreichten Tragkraft von fast 16 Kilogrammen. Die viel geringere Leistung eines ungefähr dreimal schwereren Hufeisens dürfte wohl in einer nicht entsprechenden Beschaffenheit des Ankers [1] ihren Grund gehabt haben.

Immerhin würde aber auch eine bessere Übereinstimmung der berechneten und beobachteten Tragkräfte zu keiner Schlußfolgerung auf die Richtigkeit der Voraussetzungen berechtigen, welche bei der besagten Umgestaltung der Müller'schen Formel zu Grunde gelegt worden sind, — denn es ist nicht schwer mit Benutzung der Function arc. tg. unter sehr verschiedenen Modifikationen zu Formeln zu gelangen, die sich durch entsprechende Wahl der Constanten den Beobachtungen ziemlich gut anpassen lassen.

Ein Beleg dafür ist die Thatsache, daß ich, bevor ich jene auf die Tragkraft angewendete Formel von Müller in dessen Bericht gelesen hatte, auf eine andere mit obigen Voraussetzungen nicht vereinbare Formel gekommen war, welche mit den Versuchen mindestens ebenso gut wenn nicht besser stimmt als jene. Diese Formel ist die einfachere:

$$T = b \operatorname{arctg} a.s$$

wobei wieder $T$ die Tragkraft, $s$ die Stromstärke und $a$ und $b$ Constante bedeuten.

---

[1] Wenngleich derselbe, wie Seite 527 des citirten Berichtes bemerkt ist, einem Logeman'schen nachgebildet war.

Für das Tragkraftsmaximum = 18 meines Elektromagneten muß, wenn arctg. in Graden gerechnet wird,

$$b = \frac{18}{90} = 0 \cdot 2$$

sein, während sich für $a$ aus den Versuchen mit dem Anker $C$ der Werth 0·0202 ergibt. Mit diesen Constanten gibt die Formel nachstehende berechnete Tragkräfte im Vergleiche mit den beobachteten.

| Stromstärke | Tragkraft | |
|---|---|---|
| | berechnet | beobachtet |
| 27·34 | 5·74 | 6·15 |
| 62·85 | 10·61 | 10·90 |
| 101·02 | 13·03 | 12·82 |
| 163·09 | 14·80 | 14·50 |
| 213·95 | 15·52 | 15·50 |

Die Curve der berechneten Tragkräfte für den Anker $C$ ist in der beigefügten Zeichnung punktirt und schließt sich jener der beobachteten Tragkräfte sehr genau an. Damit soll übrigens nicht gesagt sein, daß ich auf diese Übereinstimmung großes Gewicht lege oder daraus einen Vorzug meiner Formel vor der Müller'schen herleiten will.

Weder die eine noch die andere gibt theoretische Aufschlüsse an die Hand und beide haben vorläufig nur den Werth die große Regelmäßigkeit, mit welcher sich bei sorgfältig durchgeführten Versuchen die Tragkräfte einem Grenzwerthe nähern, besser anschaulich zu machen.

Eine ausgedehntere Brauchbarkeit würden solche Formeln erlangen, wenn die Abhängigkeit der Tragkraft von den Dimensionen des Magneten soweit erforscht wäre, daß eine der Constanten (nämlich $b$ in obigen Formeln) für jeden Magnet sofort aus seinen Dimensionen berechnet werden könnte, — so wie z. B. in Folge meiner Nachweisungen über die Grenze der Magnetisirbarkeit dieselbe für jeden Magnet sofort aus seinem Gewichte bestimmt werden kann,

wodurch die experimentelle Bestimmung des Coëfficienten $\beta$ in der Formel $y = \beta\gamma \operatorname{arctg} \frac{x}{\alpha\gamma^{\frac{3}{4}}}$ entfallen ist.

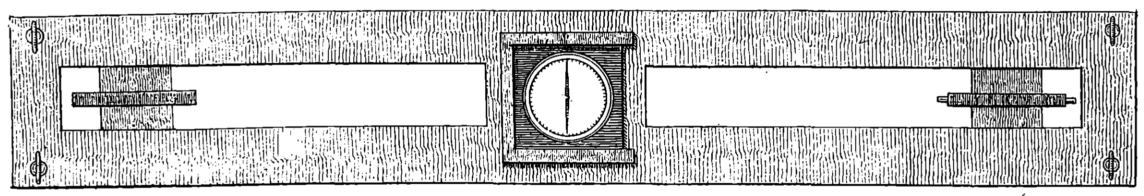
Wie man übrigens in einzelnen Fällen mit Benutzung der Häcker'schen Erfahrungen über Stahlmagnete, wenn deren Sättigung bei vorgelegtem Anker ermittelt werden kann, auf das Tragkraftsmaximum eines gleich schweren Elektromagneten zu schließen vermag, habe ich in dem Berichte über die Sitzung der königl. böhm. Gesellschaft der Wissenschaften vom 10. März 1869 bereits an einem Beispiele dargethan.

Prag, 23. April 1870.

---

Fig. 1.

Fig. 2.



Aus d. k. k. Hof-u. Staatsdruckerei.

Fig. 3.

